УДК 004.896

И.А. Варава
Институт кибернетики им. В.М. Глушкова НАН Украины, г. Киев, Украина
ivanvarava@rambler.ru

Методы распознавания образов и выделение кластеров при обработке файлов временной динамики температуры расплава кристаллизирующегося металла

Рассматривается информационная модель теплофизических процессов при кристаллизации металла для дифференциального термоанализа (ДТА). Анализируется физический смысл высокочастотной составляющей ДТА-сигнала. Построен алгоритм отыскания кластеров в многомерном пространстве параметров эксперимента для последующего выявления структурных фаз в получаемом металлическом слитке.

Введение

Для различных задач металлургии, технологий литья металлов актуален автоматизированный экспресс-анализ временной динамики температуры кристаллизирующегося расплава металла (динамический термоанализ – ДТА) [1]. Непосредственно получаемым файлом на первой стадии ДТА является цифровая последовательность показаний температуры термопары в пробнице с металлическим расплавом для совокупности равномерных отсчетов времени.

Далее полученный файл отсчетов температуры обычно подвергается той или иной специальной процедуре сглаживания и/или фильтрации для получения некоторой достаточно гладкой кривой зависимости температуры от времени $T(t)$, которая затем подвергается однократному дифференцированию по времени и нормированию.

Для получаемой при этом кривой $(dT(t)/dt)/T(t) = d\ln T(t)/dt$ рассчитываются ее экстремальные точки и другие особенности, ассоциированные с началом или концом формирования основных фаз кристаллизирующего расплава в соответствии с файлом библиотеки файлов фаз многокомпонентных сплавов (БФМС) [2-4]. Как известно, данные о фазовом составе получаемого металла являются весьма востребованным компонентом информационной модели как самого процесса кристаллизации, так и всей совокупности предшествующих ему этапов подготовки и обработки анализируемого металлического расплава, а также степени адекватности итоговых данных ДТА [5] реальным процессам кристаллизации.

Далее с целью изучения вклада явлений конвекционного переноса тепла в расплаве ставится задача на базе эксперимента выяснить меру зависимости показаний термопары в процессе остывания от места ее расположения внутри ограниченного объема пробницы с расплавом. Такой эксперимент направлен на выявление корректности учета неравномерности в пространстве и времени поля температур в кристаллизирующемся расплаве, находящемся в пробнице. Иными словами, анализируем степень однородности в пространстве процесса остывания и последующей кристаллизации расплава.

Получение температурных кривых

Для задачи динамического термоанализа с участием автора [5] был проведен эксперимент на специальном моделирующем стенде «Мульти_ДТА» по одновременному снятию температурных кривых с 4 «почти одинаковых термопар» типа ХА, введенных через крышку сосуда в тестируемую жидкость симметрично (сосуд с водой, нагретой до точки кипения воды при давлении 1 Атм), как показано на рис. 1.

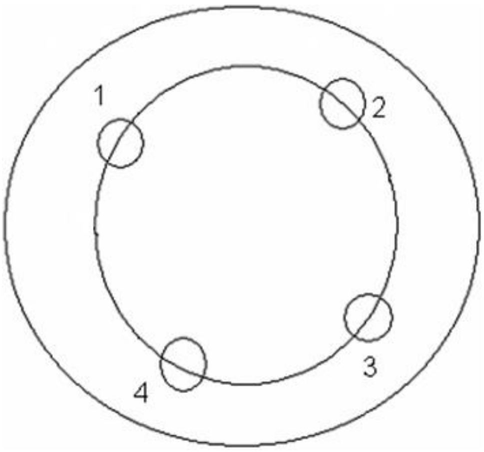


Рисунок 1 – Схема расположения 4 термопар в сосуде с тестируемой жидкостью

При этом получаемые данные 4 каналов в реальном времени поступают в компьютер через устройство USB NI 9211 фирмы National Instruments.

Предполагалось с целью извлечения необходимой информации на фоне шумов полученные при этом синхронные измерения четырех кривых охлаждения сопоставить между собой, используя результаты вычисления 6 парных корреляционных функций для 4 температурных кривых, то есть для каждой пары каналов. В определенные моменты времени дважды (для t = 750 с и t = 1700 с) включался на 20 секунд дополнительный источник тепла.

Результаты прямых 4-канальных измерений поля температур приведены ниже на рис. 2. На рис. 3 приведены в качестве примера полученные в нашей работе [5] попарные корреляции для пар 1 – 2; 2 – 3; 1 – 3; 2 – 4.

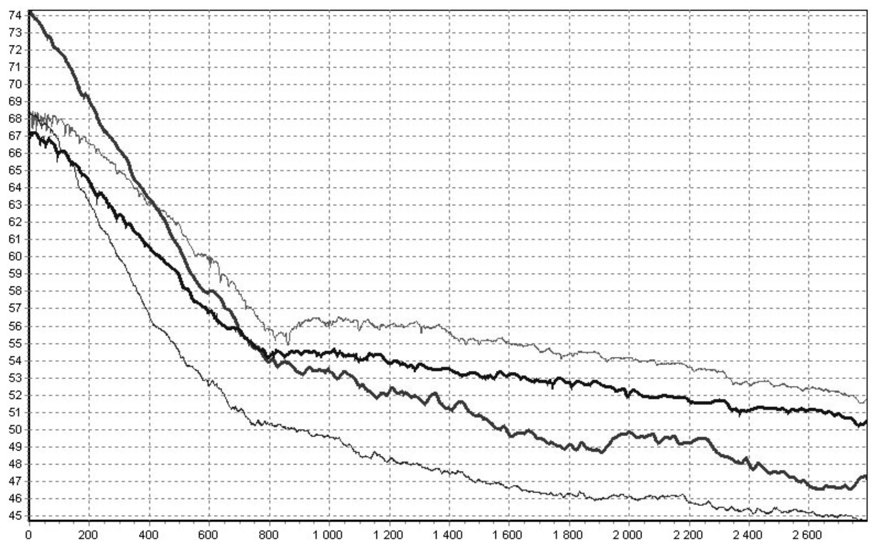
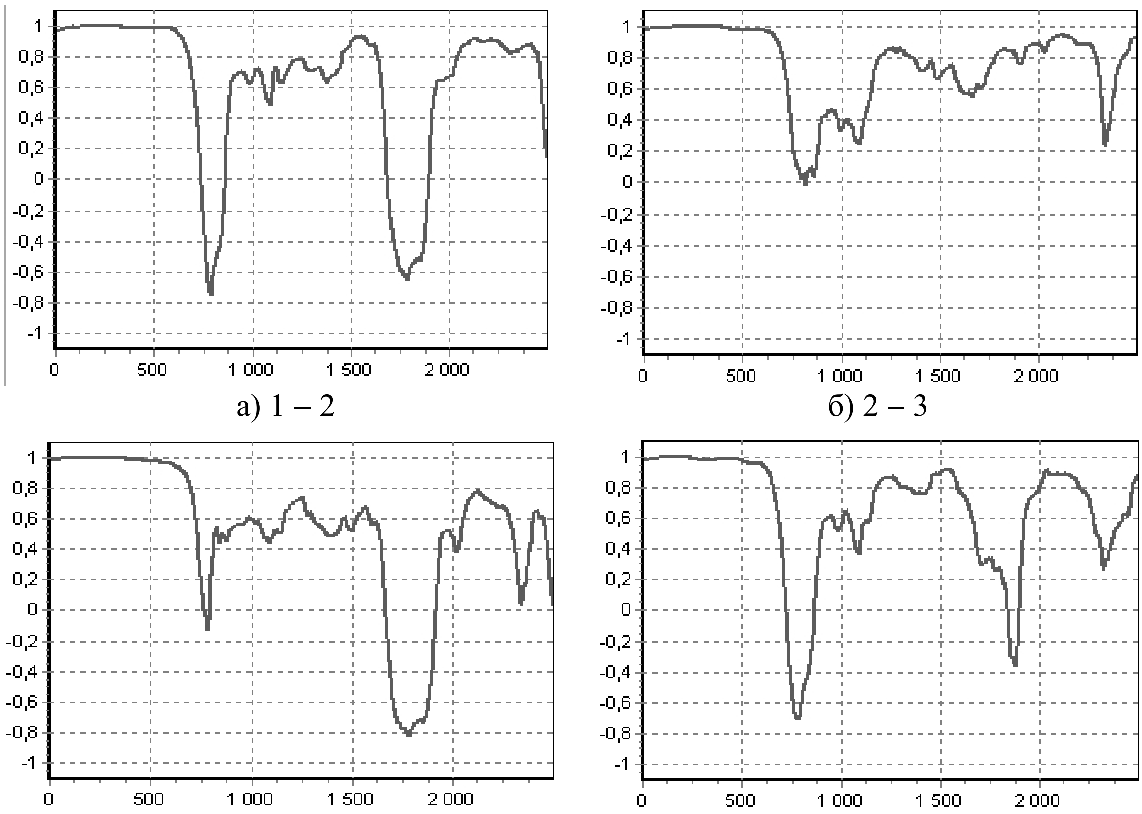


Рисунок 2 – Результаты прямых 4-канальных измерений



а) 1 – 2 б) 2 – 3

в) 1 – 3 г) 2 – 4

Рисунок 3 – Некоторые попарные корреляции
а), б), в), г) для четырех кривых, показанных на рис. 2

Результаты вычисления парных корреляционных функций приведены на рис. 3. Проанализировав рис. 3, можно сделать следующие выводы:

1. «Шумовая» составляющая сигнала значительна: меньше 5 % при $t \in (0,670]c$ и 5...12 % $t \in (671,2400]c$.

2. В комплексе сигнал + шум доля шума скачком возрастает на участке t > 671 с.

3. Из анализа парных корреляций сигналов 4-х каналов, показанных на рис. 2, следует, что подавляющую долю эксперимента (>95 %) сигналы в разных каналах коррелированны. Например для 1 и 2 каналов корреляционная функция превышает 0,5 для 75 % времени и лежит в течение 10 % времени эксперимента в области отрицательных значений корреляции (–0,2…–0,8). Подобная закономерность коррелированности оказалась свойственна и парам 1 – 3; 2 – 4; 3 – 4. Для пар 2 – 3 и 1 – 4 значения корреляционной функции не попадают в область отрицательных значений и лежат в пределах 0,6…1,0 в течение 62 % всего времени эксперимента.

4. Из выводов 1 – 3 следует, что для понимания вклада реальных процессов конвективного теплообмена в охлаждающемся расплаве использование единственной термопары для большинства практических требований контроля качества получаемого слитка металла совершенно недостаточно. Необходимо проводить измерения параллельно значительным количеством однотипных термопар.

5. При наличии данных N×M штук термопар получить данные измерения температуры кристаллизирующегося расплава по N×M каналам можно с помощью алгоритма, описанного в работе [6], рассчитать поле температур в приграничной (к внешней поверх-

ности) зоне изложницы. Точность такого метода расчета оценочно может быть получена методами работ [5], [6].

Это предположение означает, что высокочастотная составляющая ДТА-кривой (от нее мы избавляемся с помощью сглаживания сплайнами) несет важную информацию о ходе процесса кристаллизации конкретного образца сплава, которая в высокой степени индивидуальна для каждого конкретного образца кристаллизирующегося сплава. Это последнее предположение об информативности высокочастотной составляющей ДТА-кривой подтверждается результатами нашей работы [6] о результатах проведения эксперимента на специальном стенде «Мульти_ДТА» для нескольких термопар одновременно как аналоговой модели теплофизических процессов в пробнице с кристаллизирующимся металлом.

При исследовании (теоретическом и экспериментальном) движения турбулентных потоков жидкости или газа для обнаружения закономерностей измеряемых стохастических процессов в условиях быстрых пульсаций измеряемых параметров активно используют аппарат статистического анализа. Такой аппарат позволяет выявить некоторые важные закономерности для термобарических и кинематических параметров среды, усредненных по малым интервалам пространства и времени. Эти статистические методы включают, в частности, методы вычисления корреляционных и автокорреляционных функций измеряемых параметров (поле скоростей, температур, давления и др.). В этом смысле, обнаруженные особенности поведения парных корреляционных функций, проявляющиеся на рис. 6, позволяют сделать предварительный вывод о возможности проявления в подобных экспериментах упорядоченных локализованных 3-мерных вихревых структур, которые относительно медленно распространяются в тестируемом объеме остывающей жидкости, перенося с собой запасенную в данном локальном объеме соответствующую порцию кинетической энергии, которая в конечном итоге со временем диссипируется во всем объеме жидкости. Такие объекты относятся к категории так называемых ползущих течений и в нашей работе [6] условно названы «блуждающими вихрями».

Наличие системы «блуждающих вихрей» может давать значительный вклад в снижение градиента температур в охлаждающейся жидкости. Это может быть использовано как дополнительный механизм управления процессами кристаллизации расплавов металлов, полимеров и других материалов, получаемых в металлургии, органической и неорганической химии и физической химии. Такой вклад альтернативен вкладу в тепломассоперенос обычной теплопроводности, которая реализуется за счет механизма чисто молекулярной тепловой диффузии.

Очистка базы данных температурных кривых

Для построения системы автоматического определения характеристик алюминиевых сплавов методом дифференциального термического анализа необходимо иметь базу данных температурных кривых определенного качества, о котором говорится далее. При записи температурной кривой с помощью пробницы с термопарой особые требования предъявляются к спаю термопары. Накопленная ранее база данных температурных кривых не может быть полностью использована в качестве обучающей выборки, так как содержит термограммы, по которым не проводились дублирующие методы анализа. Формирование обучающей выборки является основной **целью данного исследования**.

Процесс кристаллизации алюминия в пробнице протекает за время, определяемое, главным образом, фазовым составом. Поэтому в обучающую выборку выбираются кривые определенной длины. Длина температурной кривой зависит от температуры начала записи (жидкий сплав 700°C) и температуры конца записи (твердый сплав 400°C).

Используемый алгоритм ДТА предполагает вычисление кривой темпа охлаждения. Исходя из этого, возникает ограничение на гладкость исходной кривой. В работе проводится сглаживание кривых температуры и темпа охлаждения с помощью сплайнов. В большинстве случаев значения темпа охлаждения попадают в определенный диапазон. В связи с этим отбраковываются кривые с большой разницей максимального и минимального значений темпа охлаждения.

На следующих рис. 4 – 6 показано, что подавляющая часть кривых темпа охлаждения имеют небольшие значения минимального $\min_\tau$ и максимального $\max_\tau$ темпов охлаждения. На рисунках ось абсцисс соответствует минимальному значению темпа охлаждения, а ось ординат – максимальному.

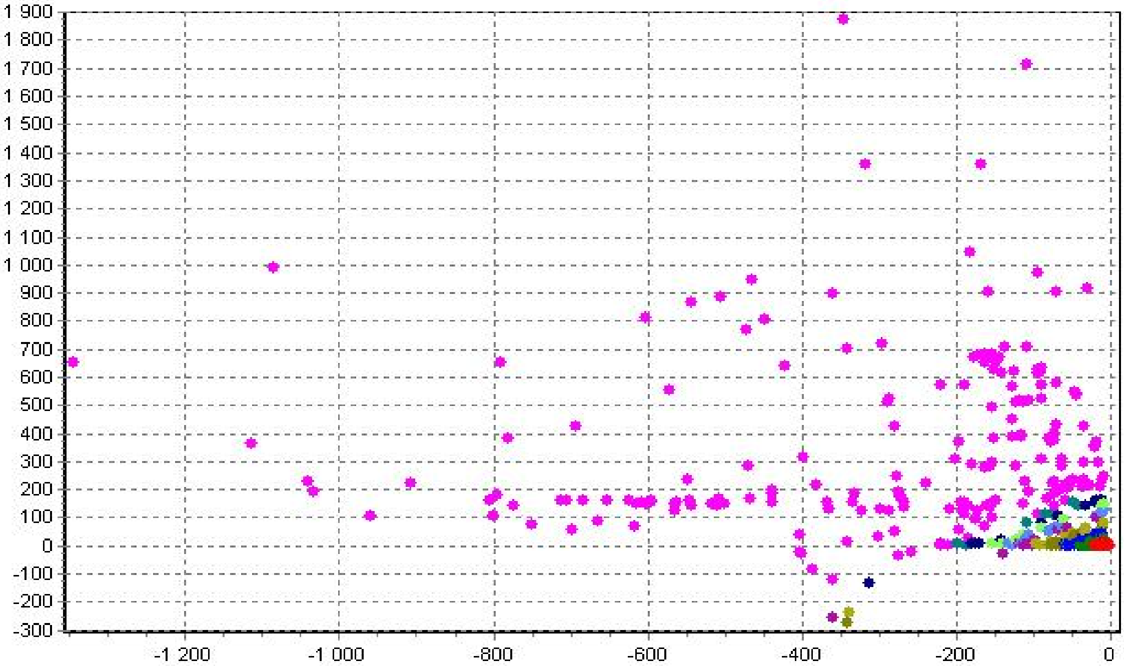


Рисунок 4 – Зависимость $\max_\tau(\min_\tau)$

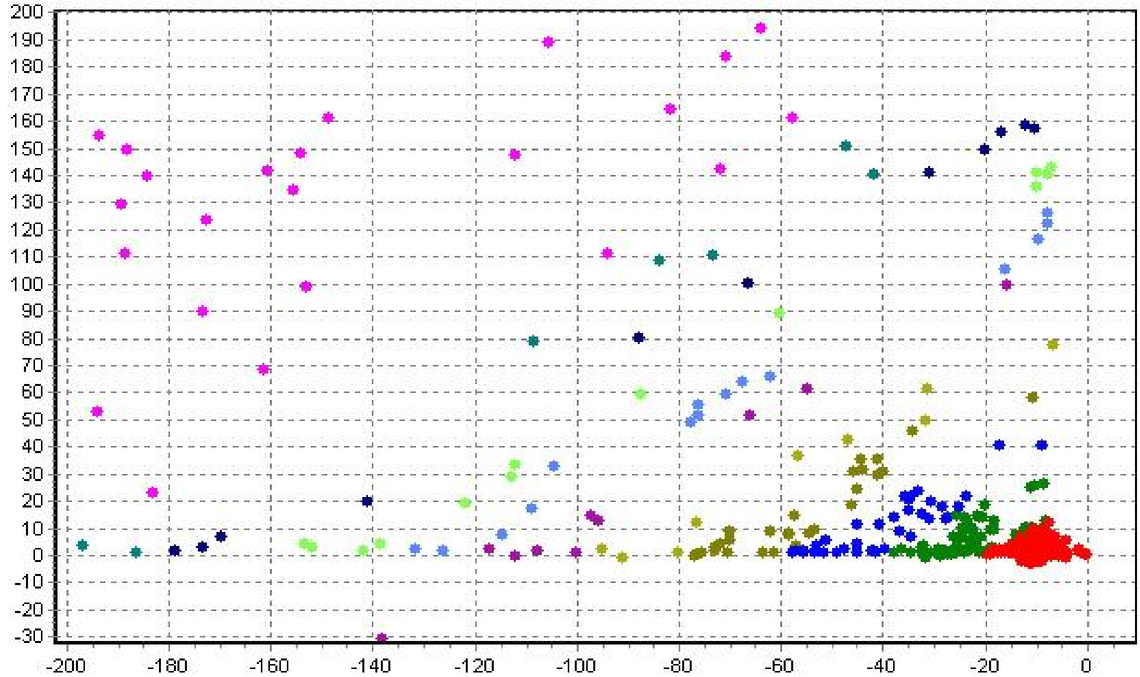


Рисунок 5 – Зависимость $\max_\tau(\min_\tau)$ (увеличено в 10 раз)

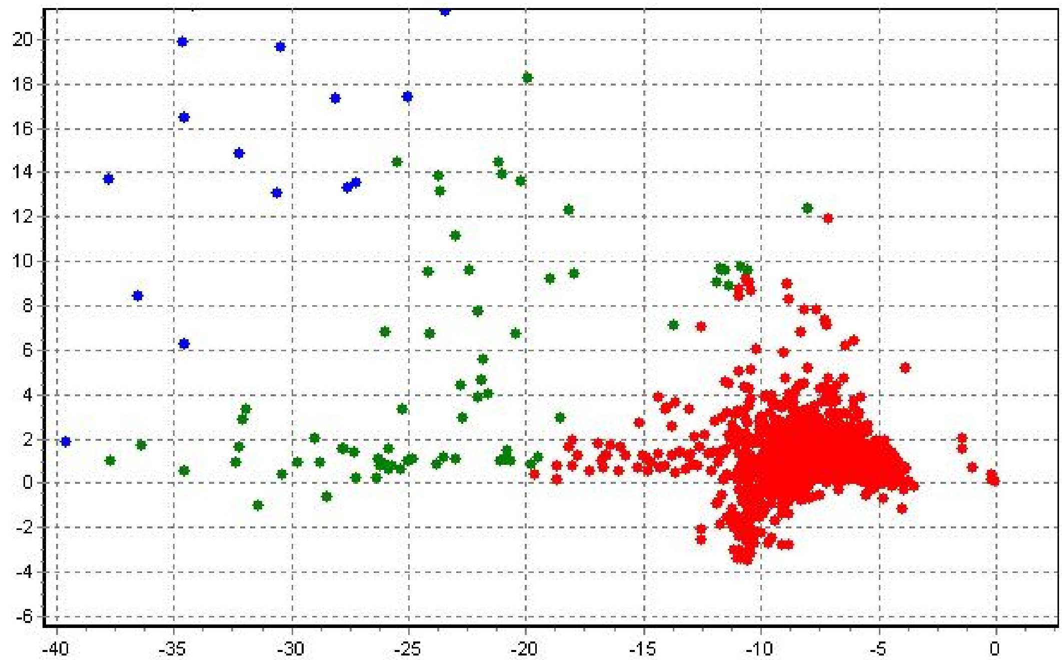


Рисунок 6 – Зависимость $\max_\tau(\min_\tau)$ в окрестности основного кластера

На рис. 7, 8 показано, что обучающую выборку можно составить из 77 % или 85 % температурных кривых, для которых разница максимального и минимального темпов охлаждения лежит в пределах 20 единиц.

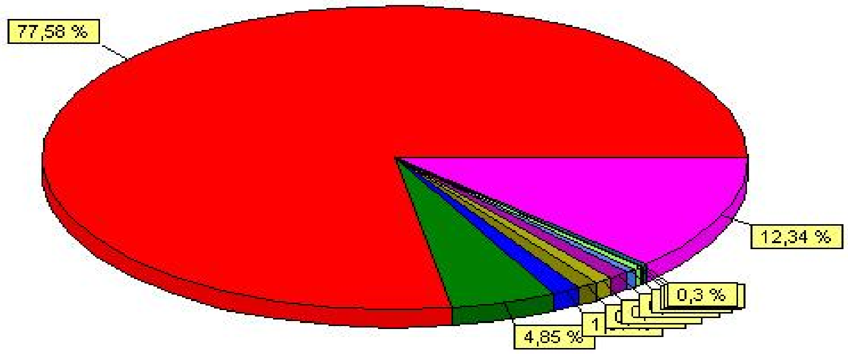


Рисунок 7 – Доля удовлетворительных кривых до сглаживания

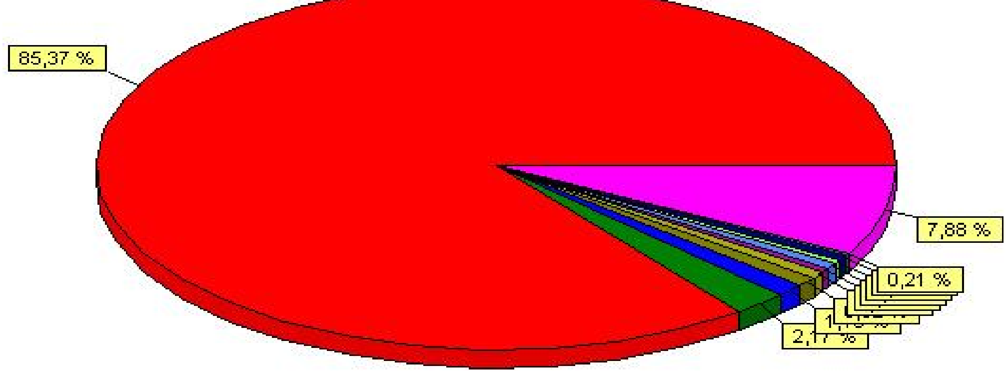


Рисунок 8 – Доля удовлетворительных кривых после сглаживания

При этом 85 % кривых составляют кластер с координатами (–7,486; 1,004) и дисперсией (3,082; 1,144).

Выводы

Сопоставление гистограммы до и после сглаживания приводит к предположению о том, что сглаживание сплайнами, как оказывается, уменьшает индивидуальность отдельных ДТА-кривых (формально за счет «мягкого игнорирования высокочастотного шума $f_0 \pm \Delta f$ Гц»). Это предположение, по сути, означает, что высокочастотная составляющая ДТА-кривой, от которой мы избавляемся с помощью сглаживания сплайнами, несет важную информацию о ходе процесса кристаллизации конкретного образца сплава, которая в высокой степени индивидуальна для каждого конкретного образца кристаллизирующегося сплава. Последнее предположение об информативности высокочастотной составляющей ДТА-кривой в значительной степени подтверждается результатами нашей работы [6] о результатах проведения эксперимента на специальном стенде «Мульти_ДТА» для нескольких термопар одновременно как аналоговой модели теплофизических процессов в пробнице с кристаллизирующимся металлом.

Литература

1. Бялик О.М., Ментковский И.Л. Некоторые вопросы динамической теории затвердевания металлических отливок. – К.: Вища школа, 1982. – 179 с.
2. Мондольфо Л.Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов: Пер. с англ. – М.: Металлургия, 1979. – 640 с.

3. Шипицын С.Я., Бабаскин Ю.З., Писаренко В.Г., Дубоделов В.И., Золотарь Н.Я., Смульский А.А., Фикссен В.Н., Короленко Д.Н. Повышение эффективности внепечной обработки сталей модифицированием азотом // Процессы литья. – 2006. – № 1. – С. 30-39.
4. Алиева С.Г., Альтман М.Б., Амбарцумян С.М. Промышленные алюминиевые сплавы. – 2-е издание. – М.: Металлургия, 1984. – 364 с.
5. Самарский А.А. Теория разностных схем. – М.: Наука, 1977. – 656 с.
6. Писаренко В.Г., Варава И.А. Информационные модели теплофизичесеких процессов при измерениях временной динамики температуры кристаллизирующегося расплава металла // Комп'ютерні засоби, мережі та системи. – 2007. – № 6. – С. 67-74.

І.А. Варава

Методи розпізнавання образів і виділення кластерів при обробці файлів часової динаміки температури розплаву металу, який кристалізується

Розглядається інформаційна модель теплофізичних процесів при кристалізації металу для диференціального термоаналізу (ДТА). Аналізується фізичний зміст високочастотної складової ДТА-сигналу. Побудований алгоритм відшукування кластерів у багатомірному просторі параметрів експерименту для наступного виявлення структурних фаз в одержуваному металевому злитку.

I. Varava

Methods of Images Parsing and Clusters Recognition at Processing Files of Time Dynamics of Temperature of the Fused Crystallized Metal

The information model of thermal physical processes is examined at crystallization of metal for differential thermal analysis (DTA). The physical environment of a high-frequency component of the DTA-signals is analyzed. The algorithm of clusters recognition in multivariate space of parameters of experiment for the subsequent revealing structural phases in a metal ingot is developed.

Статья поступила в редакцию 01.07.2008.